

罐区生产运行中的安全风险识别与防控策略研究

乔海洋 苏养育

浙江石油化工有限公司 浙江 舟山 316000

摘要: 本文旨在系统性地探讨罐区在生产运行过程中面临的主要安全风险,深入剖析其成因,并在此基础上构建一套科学、高效、多层次的综合防控策略体系。文章首先对罐区的典型风险进行分类识别,包括物料固有风险、设备设施风险、操作管理风险及外部环境风险;其次,介绍了HAZOP、LOPA、QRA等定性与定量相结合的风险评估方法;最后,从工程技术、安全管理、应急响应和智能化建设四个维度,提出涵盖本质安全设计、预防性维护、标准化作业、人员培训、应急预案优化以及智能监测预警等在内的全方位、立体化防控策略。研究表明,通过将被动防御转变为主动预防,并深度融合现代信息技术,能够显著提升罐区的本质安全水平和风险抵御能力,为保障国家能源安全和化工产业高质量发展提供坚实支撑。

关键词: 罐区; 安全风险; 风险识别; 风险评估; 防控策略

引言

在全球工业化提速下,石油、化工等流程工业成为国民经济重要支柱,罐区作为产业物流链条关键节点,作用不可或缺。它既是原料等产品集散地,也是调节生产、保障供应链稳定的战略缓冲区。但罐区内储存的多为甲、乙类火灾危险性液体或气体,有易燃、易爆等危险特性,一旦发生泄漏、火灾等事故,后果灾难性,会造成经济损失、威胁人员生命安全,破坏生态环境。近年来,天津港“8·12”等重大罐区事故,以惨痛代价警示我们,罐区安全管理不容懈怠。传统事后处置和经验判断为主的安全管理模式,难应对复杂生产环境和高标准安全要求。所以,系统精准识别罐区潜在风险,采取科学有效防控措施,将风险控制在可接受范围,是安全生产领域亟待解决的核心问题。

1 罐区生产运行中的主要安全风险识别

1.1 物料固有风险

1.1.1 火灾与爆炸风险

绝大多数储罐内物料的闪点低、爆炸极限范围宽。一旦发生泄漏,在空气中形成可燃蒸气云,遇到点火源(如明火、电气火花、静电放电、高温表面等)极易引发火灾甚至剧烈的蒸气云爆炸(VCE)或沸腾液体扩展蒸气爆炸(BLEVE)。

1.1.2 毒性与健康危害

许多化工原料和产品(如苯、氯气、氨、硫化氢等)具有剧毒或高毒性。泄漏后形成的有毒气体云团会迅速扩散,造成人员急性中毒、窒息甚至死亡,并对周边环境产生长期污染。

1.1.3 反应活性风险

部分化学品(如过氧化物、有机金属化合物等)化学性质不稳定,在受热、摩擦、撞击或与不相容物质接触时可能发生剧烈分解、聚合或爆炸。(4)环境风险:泄漏物料若进入土壤或水体,将造成严重的环境污染,治理难度大、成本高昂,且可能引发次生灾害。

1.2 设备设施风险

1.2.1 储罐本体失效

包括罐壁、罐顶、罐底的腐蚀减薄、裂纹、变形等。腐蚀是导致储罐失效的最主要原因,特别是对于储存含硫、含水介质的储罐,底部和焊缝区域尤为脆弱。此外,超压(呼吸阀、紧急泄压装置失效)、负压(抽瘪)、基础沉降不均等也会导致结构破坏^[1]。

1.2.2 管道与阀门泄漏

连接储罐的工艺管线、进出料管线、消防管线等因腐蚀、冲蚀、疲劳、焊接缺陷或密封失效而发生泄漏。阀门内漏、外漏或开关失灵是常见的故障模式。

1.2.3 附件与仪表故障

液位计(尤其是外浮筒式)、压力表、温度计、高低液位报警器、紧急切断阀(ESD)等关键安全附件和仪表若出现故障或失准,将导致操作人员无法准确掌握罐内状态,延误应急处置时机,甚至引发误操作。

1.2.4 电气与防雷防静电系统缺陷

电气设备不符合防爆要求、接地电阻过大、跨接线缺失或断裂、人体静电消除器失效等问题,都可能成为潜在的点火源。

1.3 操作与管理风险

1.3.1 违章作业

如未执行受限空间作业、动火作业、高处作业等特

殊作业许可制度；在装卸车、倒罐等操作中违反操作规程；擅自解除联锁或屏蔽报警。

1.3.2 巡检与维护不到位

巡检流于形式，未能及时发现设备跑冒滴漏、仪表异常、防腐层破损等隐患；预防性维护（PM）和预测性维护（PdM）计划执行不力，导致设备带病运行。

1.3.3 变更管理失控

对工艺、设备、操作程序或组织架构的任何变更，若未经过严格的风险评估（MOC），极易引入新的未知风险。

1.3.4 承包商管理薄弱

对进入罐区施工的承包商资质审查不严、安全培训不足、现场监管缺失，是许多事故的导火索。

1.3.5 安全文化缺失

企业安全投入不足，员工安全意识淡薄，存在侥幸心理，“三违”（违章指挥、违章操作、违反劳动纪律）现象普遍。

1.4 外部环境风险

1.4.1 自然灾害

地震可能导致储罐倾覆、管线断裂；洪水可能淹没罐区，导致浮顶罐沉盘、电气设备短路；雷击可能直接引发火灾或损坏控制系统；极端高温或低温会影响物料性质和设备性能。

1.4.2 周边环境

罐区与周边公共设施、居民区、交通干线的安全距离不足，一旦发生事故，后果将被放大。周边企业的生产活动（如排放火花、产生震动）也可能构成威胁。1.4.3 恐怖袭击与人为破坏

虽然概率较低，但对于国家战略储备库等关键设施，此类风险不容忽视。

2 罐区安全风险评估方法

2.1 定性风险评估方法

2.1.1 安全检查表法（SCL）

根据法规、标准和最佳实践，编制详细的检查清单，对罐区的各个方面进行逐项核查。该方法简单直观，适用于日常安全检查和合规性审查。

2.1.2 工作危害分析法（JHA）

针对特定的作业活动（如清罐、检修），将其分解为若干步骤，逐一识别每个步骤中存在的危害，并评估风险等级，进而制定相应的控制措施。

2.1.3 危险与可操作性分析（HAZOP）

这是一种系统化的、基于引导词（如“无”、“多”、“少”、“反向”等）的团队研讨方法。通过对工艺参数（流量、压力、液位、温度、组分等）的偏离进行分析，全面

识别设计、操作和设备中存在的潜在危险和可操作性问题^[2]。HAZOP是石化行业进行工艺危害分析（PHA）的黄金标准，尤其适用于新、改、扩建项目和重大变更后的风险评估。

2.2 半定量与定量风险评估方法

2.2.1 保护层分析（LOPA）

LOPA是在HAZOP等定性分析基础上发展起来的半定量方法。它将初始事件（如管道破裂）导致的后果与独立保护层（IPLs，如基本过程控制系统BPCS、报警与人员干预、安全仪表系统SIS、物理保护如围堰、应急响应等）的有效性结合起来，计算场景的剩余风险频率，并与企业的风险容忍标准进行比较，以判断是否需要增加或强化保护层（例如，是否需要设置SIS）。

2.2.2 定量风险评价（QRA）

QRA是一种更为精确和全面的评估方法。它利用数学模型（如CFD计算流体力学模型）模拟事故场景（泄漏、扩散、火灾、爆炸）的物理过程，计算个人风险（Individual Risk, IR）和社会风险（Societal Risk, F-N曲线），并评估事故对人员、财产和环境造成的预期损失。QRA结果常用于土地使用规划、保险定价以及重大危险源的宏观安全管理决策。

通过上述方法的综合应用，可以建立起罐区风险的“四色图”（红、橙、黄、蓝），实现风险的可视化、动态化管理，确保高风险区域和作业得到重点关注和有效控制。

3 罐区安全风险综合防控策略

3.1 工程技术防控——筑牢本质安全根基

工程技术措施是从源头上消除或减弱风险的根本途径，体现了“本质安全”的理念。（1）优化总图布置与安全间距：严格按照《石油化工企业设计防火标准》（GB50160）等规范进行设计，确保储罐之间、罐组之间以及罐区与周边设施之间留有足够的防火间距和安全防护距离。合理分区，将不同火灾危险性的物料分开储存。（2）采用先进可靠的设备与材料：选用符合规范要求的储罐类型（如内浮顶罐、球罐），并根据储存介质的特性选择合适的罐体材质和防腐方案。推广使用本质安全型仪表和防爆电气设备。（3）完善安全附件与联锁系统：确保机械呼吸阀、液压安全阀、紧急泄压人孔等正常工作，防止超压或负压。采用高可靠性、冗余配置的液位测量和高/低液位报警联锁系统，防止冒罐或抽空。在罐进出口管道上设置远程可控的紧急切断阀，并与火灾报警、可燃气体/有毒气体报警等信号联锁，实现快速隔离^[3]。（4）强化泄漏控制与收集：设置足够容量的防火堤（围堰），其有效容积应不小于罐组内最大单罐的容积。堤内地面应做防渗处理，

并设有排水切换设施,确保泄漏物料能被有效围堵和收集,防止流入雨水系统或外环境。(5)升级消防系统:配置固定式消防冷却水系统和泡沫灭火系统,并定期进行测试和维护,确保其随时处于可用状态。对于大型罐区,可考虑增设消防机器人等智能化装备。

3.2 安全管理防控——规范人的行为与流程

再好的硬件设施也需要健全的管理体系来保障其有效运行。(1)建立健全安全管理制度:制定并严格执行覆盖所有作业环节的操作规程、安全管理制度和应急预案。重点强化特殊作业许可管理、设备完整性管理(MI)、变更管理(MOC)和承包商管理。(2)推行设备完整性管理(MI):建立以风险为基础的检验、检测和预防性维修(RBI/NDT/PM)体系。利用超声波测厚、内窥镜、声发射等技术对储罐和管道进行定期检测,基于数据驱动进行维修决策,变被动抢修为主动预防。(3)加强人员培训与能力建设:对所有员工(包括承包商)进行系统的、常态化的安全培训,内容涵盖岗位风险、操作规程、应急处置、自救互救等。通过桌面推演、实操演练等方式,不断提升员工的风险意识和应急技能。(4)培育积极的安全文化:领导层要以身作则,将安全置于一切工作的首位。鼓励员工主动报告隐患和未遂事件(NearMiss),建立非惩罚性的报告机制,从错误中学习,持续改进。通过安全观察与沟通(STOP/SAFETYMOMENTS)等活动,营造“人人讲安全、事事为安全”的文化氛围。

3.3 应急响应防控——兜住最后一道防线

当风险失控,事故发生时,高效的应急响应是减轻后果的关键。(1)完善应急预案体系:制定针对性强、可操作的综合预案、专项预案和现场处置方案。预案应明确应急组织、职责分工、处置程序、通讯联络、疏散路线、救援资源等要素。(2)强化应急物资与队伍建设:配备充足的、适用的应急救援器材和个人防护装备(PPE)。建立专兼职相结合的应急救援队伍,并定期进行专业化训练和联合演练,确保召之即来、来之能战^[4]。(3)建立高效的应急联动机制:与地方政府、消防、医疗、环保等外部救援力量建立紧密的联动机制,实现信息共享、资源互补和协同作战。定期组织厂地联合应急演练,磨合机制,提升整体响应效能。

3.4 智能化与信息化防控——赋能安全管理升级

随着物联网、大数据、人工智能等技术的发展,智慧罐区建设为安全风险防控开辟了新路径。(1)构建智

能感知网络:在罐区全域部署高精度、高可靠性的传感器网络,实时监测液位、压力、温度、可燃气体、有毒气体、火焰、视频等关键参数,实现风险的“早发现、早预警”。(2)打造一体化智能管控平台:整合DCS、SIS、GDS(气体检测系统)、消防系统、视频监控、人员定位等各子系统数据,打破信息孤岛。利用大数据分析和AI算法,对海量数据进行深度挖掘,实现异常工况的智能诊断、风险态势的动态评估和事故的智能预警。(3)应用数字孪生技术:构建罐区的三维数字孪生体,将物理世界与虚拟世界实时映射。可用于应急演练的虚拟仿真、事故回溯分析、设备健康管理以及未来改造方案的预演,极大提升管理决策的科学性和前瞻性。(4)推广智能巡检与作业监管:利用智能巡检机器人、无人机替代人工进行高风险区域的巡检。通过人员定位、电子围栏、智能视频分析等技术,对特殊作业进行全过程、无死角的在线监控,自动识别和制止违章行为。

4 结语

本文通过对罐区生产运行中物料、设备、人因及环境四大类风险的系统识别,并结合HAZOP、LOPA、QRA等科学评估方法,揭示了风险的内在逻辑与演化规律。在此基础上,提出的“工程技术+安全管理+应急响应+智能化”的四位一体综合防控策略,构成了一个从源头预防、过程控制到末端兜底的完整闭环。未来,罐区安全管理的趋势必然是向“本质安全化”和“智能化”深度融合的方向发展。一方面,要持续通过优化设计、选用可靠设备、强化维护等手段,不断提升系统的固有安全性;另一方面,要充分利用新一代信息技术,构建智慧安全新生态,实现风险的超前感知、精准预警和智能决策。唯有如此,才能真正将安全风险牢牢锁在笼子里,为企业的可持续发展和社会的和谐稳定保驾护航。

参考文献

- [1] 岑艳,王伟弟.罐区安全风险及管控措施[J].现代工业经济和信息化,2022,12(08):345-346.
- [2] 侯庆昌,韩金波,周波.基于多米诺效应的油气储罐区安全风险定量评价研究[J].化工安全与环境,2022,35(49):6-13.
- [3] 卜文闯.某石化公司原油罐区安全风险分析及防控[J].化工管理,2021,(23):95-96.
- [4] 陈云霞.石油储运企业大型原油罐区安全风险分析与安全管理策略探究[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(04):54-56.